黄土丘陵区典型人工林的根系分布特征

李 浩[1,2]， 胡婵娟[1]， 赵荣钦[2]， 郭 雷[1]， 满 洲[3]

（1. 河南省科学院地理研究所，河南 郑州 450052；2. 华北水利水电大学测绘与地理信息学院，河南 郑州 450045；3. 天津市市政工程设计研究院郑州分院，河南 郑州 450001）

摘　要：根系是植物吸收水分和养分的主要器官，发育及分布情况对植物生长具有极其重要的影响。本研究以甘肃省定西市安定区龙滩流域的人工白杨林、油松林以及山杏林为研究对象，分析了3种人工林总根及不同径级的根长、根面积、根生物量密度的垂直分布特征及其与土壤理化性质之间的关系，旨在从根系分布角度比较黄土丘陵区典型人工林之间的生长差异，为该区域植被恢复与评价提供一定的科学依据。研究结果显示：（1）不同径级的根系分布中3种人工林均以细根为主，细根与总根的根长及根面积密度均表现为白杨林>油松林>山杏林，根生物量密度表现为油松林>白杨林>山杏林，而中根与粗根的根长及根面积密度均以油松林为最高。（2）垂直土壤剖面上，3种人工林总根与细根的根长、根面积及根生物量密度整体上呈现出随土壤深度的增加而减少的趋势，而中根与粗根的垂直分布规律并不明显。（3）细根和总根的根长密度、根面积密度、根生物量密度与土壤全碳、全氮、有机碳及含水量均呈极显著正相关关系，中根的根长及根面积密度与土壤全碳、全氮、全磷及有机碳含量呈显著相关关系，粗根的根长及根面积密度与土壤全碳呈显著相关关系，土壤碳氮含量以及含水量的增加与林木根系的生长在一定程度上存在协同效应。

关键词：黄土丘陵区；人工林；根系；径级

根系是植物的主要功能器官[1]，承担着植物与土壤之间物质和能量的交换[2]，其发育及分布情况对植物生长具有极其重要的影响，同时根系的生长也受树种特性、树龄、土壤及生态环境等诸多条件因素的影响和制约[3-5]。对于林木根系分布的研究可为困难立地树种适应性评估提供科学依据[6]。近几年对土壤养分与根系分布的关系研究也日益增多[7-9]。植物的根系可以增强土壤结构的稳定性，增加碳的储存以及促进植物养分的吸收[10-12]，来自活根的碳输入甚至比根/枝凋落物的碳输入更有效地形成有机碳。根系的粗细可以反应不同的生理功能[13-14]。较粗的根主要起到锚固支撑和运输水分及养分的作用。细根担负着吸收水分和养分的功能，是连接植物与土壤之间物质和能量交换的主要桥梁。

黄土高原作为水土流失最为严重的地区之一[15]，自退耕还林还草政策实施以来，水土流失得到有效遏制，植被恢复取得良好进展，但随着恢复年限的增长，不同恢复树种的生长适宜性出现差异，出现了诸如“老头树”等植被退化现象，植被生态服务功能不能很好体现。目前，针对黄土高原地区不同人工林下土壤生态系统的变化及植物自身根系生物量的比较已经开展了相对较多的研究[16-19]，但对于利用能反映土壤资源有效性的根长密度及根面积密度指标来比较不同人工林生长适宜性的研究相对较少。因此，本研究以典型黄土丘陵区甘肃省定西市龙滩流域的3种人工纯林白杨、油松与山杏林为研究对象，分析总根及不同径级不同土层深度根系的根长密度、根面积密度以及根生物量密度的分布情况，以期为黄土高原植被恢复和适宜树种的选择提供一定的科学依据。

收稿日期：2020-12-21；　**修订日期：**2021-03-03

基金项目：国家自然科学基金项目（41801103）；国家重点研发计划项目（2016YFC0501701）；河南省科学院基本科研费项目（210601015）；河南省重点研发与推广软科学研究项目（212400410341）

作者简介：李浩（1995-），男，硕士研究生，主要从事植被恢复与土壤生态学的研究. E-mail: 876320273@qq.com

通讯作者：胡婵娟. E-mail: huchanjuan1981@126.com

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

研究区位于甘肃省定西市安定区龙滩流域，地理位置为35°43′~35°46′N，104°27′~104°32′E，流域总面积约为16.1 km²，海拔范围为1840~2260 m，温带大陆性季风气候，年平均气温6.8 ℃，1月平均气温-7.9 ℃，极端最低气温为-27.1 ℃，最高温度为34.9 ℃。年平均日照时长达2053 h，年均降水量为386 mm，降雨量少且分配不均，集中在7—9月。研究区内的主要土壤类型是黄绵土，土体疏松，质地均一，主要种植的人工植被有白杨(*Populus tomentosa*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、云杉(*Picea asperata*)以及柠条(*Caragana intermedi*)。天然植被主要有本氏针茅(*Stipa bungeana*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、百里香(*Thymus mongolicus*)等草本植物。

1.2　研究方法

在研究区内选择坡度、坡向、海拔以及其他自然环境因子相近的白杨林、油松林、山杏林3块20 m×20 m的样地，其中白杨林与山杏林种植于20世纪80年代，油松林种植于20世纪70年代，样地基本信息如表1所示。于2018年8月，在植物生长季利用根钻法采集树木根系[20]。根系采集前，利用前期植被调查中测量的样地平均树高及胸径，在每块样地选取3株标准木作为重复，以选取好的标准木为圆心，半径为0.5~1 m的圆内近似等距设置3个采样点，各样点用内径10 cm的根钻在1 m深度内分7层(0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm)钻取土芯，3个采样点分层采集的土样混合后作为1个样品，样品采集数量共计63个。在实验室中用筛孔为100目的筛子在流动的去离子水中多次冲洗，去除根上的灰尘和泥沙，根据根的外形、颜色、弹性等区别活根和死根并去除掉多余的草本植物根系，将处理完毕的根系置于根系扫描仪(EPSON Scan)上进行扫描，在根系扫描系统软件WinRHIZO中对根进行分级与分析，根系按照直径大小分为细根(0~2 mm)、中根(2~5 mm)，粗根(5~10 mm)3个等级，获得相应等级的根长，根表面积等根系生长指标。用游标卡尺测量出小于等于2 mm的细根，将大于2 mm与小于2 mm的根系分别放入不同的牛皮纸信封中，在105 ℃下对根系进行杀青15 min，然后在70 ℃烘箱中烘干48 h至恒重，用精度为0.0001 g的天平测出根系干重，即根系生物量[4]。

植物根系采集的同时分层采集土壤样品，测定样品中土壤全碳、全氮、全磷、有机碳及水分的含量。土壤水分采用烘干法测定且考虑旱季和雨季的影响，除此次采样外于4月份增加一次土壤水分的测定。土壤样品风干后过100目筛测定土壤全碳、全氮、全磷及有机碳，其中土壤全碳和土壤全氮均采用元素分析仪进行测定，土壤全磷采用钼锑抗比色法测定，土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法测定[21]。

1.3　数据分析与处理

本文选取3个根系指标进行计算[22]

$$R_{LD}=L_r/V \quad (1)$$

$$R_{AD}=A_r/V \quad (2)$$

$$R_{BD}=W_r/V \quad (3)$$

式中：R_{LD}为根长密度(cm·cm^{-3})；L_r为根长(cm)；V为根系所占土体体积(cm^3)；R_{AD}为根表面积密度(cm^2·cm^{-3})；A_r为根表面积(cm^2)；R_{BD}为根生物量密度(mg·cm^{-3})；W_r为根干重(mg)。

采用Excel 2003和SPSS 24软件进行数据处理和统计分析，采用单因素方差分析(ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同人工林各项根系指标差异的显著性。

2　结果与分析

2.1　3种人工林土壤养分及水分的分布特征

如表2所示，3种人工林土壤全碳、全氮及有机

表1　样地基本信息

Tab. 1　Basic information of sample plot

林型	坡位	海拔/m	坡度/(°)	坡向/(°)	株距/m	平均胸径/cm	平均树高/m
白杨	上	2010	33.25	W290.5	1.3~1.8	12.03	9.36
油松	上	2048	32.80	NW323.5	1.0~1.3	7.45	7.93
山杏	上	2147	33.96	W250.5	1.2~1.4	6.23	3.49

表2 3种人工林土壤理化性质及其在相同土层的差异性分析

Tab. 2 Analysis of soil physical and chemical properties of three plantations and their differences in the same soil layer

土层/cm	林型	土壤全碳/(g·kg^{-1})	土壤全氮/(g·kg^{-1})	土壤有机碳/(g·kg^{-1})	土壤全磷/(g·kg^{-1})
0~10	白杨	24.03b	0.70b	5.54b	0.51a
	油松	28.80ab	0.97ab	7.70ab	0.51a
	山杏	30.90a	1.33a	9.48a	0.51a
10~20	白杨	23.27b	0.53c	4.98b	0.51a
	油松	29.47a	0.97a	7.13a	0.52a
	山杏	25.20b	0.70b	5.57b	0.47a
20~30	白杨	22.83b	0.50b	4.64b	0.52a
	油松	28.40a	0.77a	6.02a	0.50a
	山杏	22.97b	0.43b	3.66b	0.48a
30~40	白杨	21.63b	0.40b	3.94ab	0.50a
	油松	25.73a	0.60a	4.38a	0.48a
	山杏	21.97b	0.37b	3.26b	0.54a
40~60	白杨	21.20b	0.33b	2.93ab	0.51a
	油松	23.97a	0.53a	3.68a	0.51a
	山杏	21.73b	0.43ab	2.69b	0.55a
60~80	白杨	20.90b	0.37a	2.67a	0.52a
	油松	23.23a	0.47a	3.24a	0.51a
	山杏	21.17b	0.37a	2.80a	0.55a
80~100	白杨	20.47b	0.30b	3.03a	0.52a
	油松	22.27a	0.47a	3.07a	0.51a
	山杏	20.57b	0.33ab	2.66a	0.54a

注:不同小写字母代表不同人工林之间差异显著。

碳含量均随着土壤深度的增加而下降。在土壤表层(0~10 cm),土壤全碳、全氮及有机碳含量均表现为山杏林最高且与其他2种人工林之间存在显著性差异(P<0.05)。在10~100 cm土层中,油松林土壤全碳、全氮及有机碳含量最高,其中土壤全碳含量在10~100 cm土层油松林均显著高于白杨林与山杏林,土壤全氮含量油松林与白杨林之间的显著性差异主要存在于10~60 cm、80~100 cm土层,与山杏林之间的显著性差异主要存在于10~30 cm土层(P<0.05);土壤有机碳含量在10~30 cm油松林显著高于白杨林(P<0.05),在10~60 cm及80~100 cm土层油松林显著高于山杏林(P<0.05)。土壤全磷含量3种人工林之间的差异不显著且在垂直方向上随土层变化不明显。3种人工林旱季和雨季土壤水分整体上呈现出随土壤深度的增加而降低的趋势(图1),油松林的土壤水分在旱季和雨季的各土层中均低于白杨林和山杏林。

2.2 3种人工林根长密度的分布特征

如图2所示,0~100 cm土层中,3种人工林中白杨林的总根长密度最高且在20~80 cm土层中与油松林和山杏林之间存在显著性差异(P<0.05)。除土壤表层(0~10 cm)外,3种人工林根长密度均表现为白杨林>油松林>山杏林。在垂直方向上,3种人工林的总根长密度均随土层深度的增加而逐渐降低。

3种人工林的根长密度以细根占比最高,均超过95%,且根长密度随径级变化明显,在各土层中表现为细根>中根>粗根(图3)。3种人工林细根的根长密度表现为白杨林最高,且在20~100 cm土层与油松林和山杏林存在显著性差异(P<0.05)。中根及粗根的根长密度整体上表现为油松林最高,但各土层中3种人工林之间未见显著性差异。

2.3 3种人工林根面积密度的分布特征

如图4所示,10~60 cm及80~100 cm土层中的根面积密度均表现为白杨林>油松林>山杏林,并且在40~60 cm土层中存在显著性差异。土壤表层(0~10 cm)表现为油松林>白杨林>山杏林,60~80 cm土层表现为白杨林>山杏林>油松林。3种人工林的根面积密度垂直土壤剖面上均呈现出随着土层深度

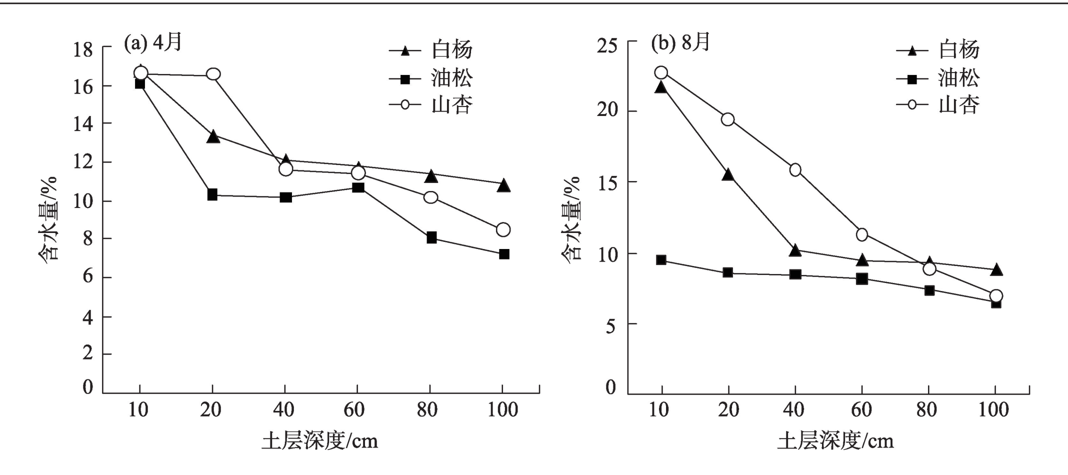
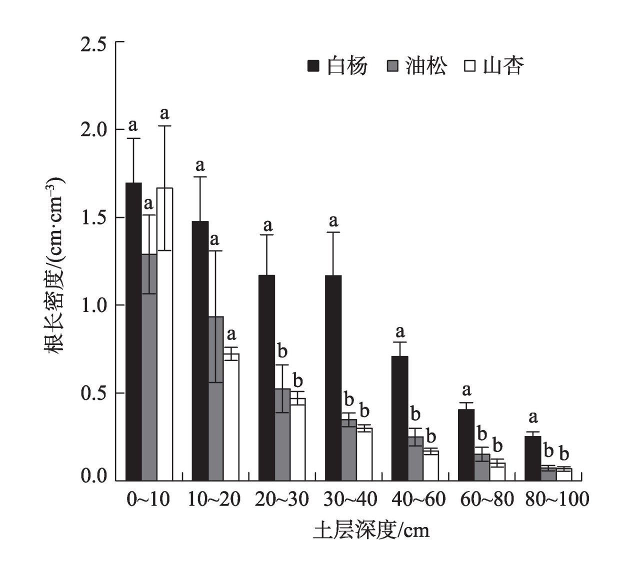


图1　3种人工林旱季(4月)和雨季(8月)土壤水分

Fig. 1　Soil moisture of three plantations in dry season (April) and rainy season (August)



注:不同小写字母代表不同人工林之间差异显著(P<0.05),下同。

图2　不同土层深度下3种人工林的总根长密度分布

Fig. 2　Total root length density distribution of three artificial forests in different soil depths

的增加而减少的趋势。

3种人工林的细根根面积密度占总根面积密度的70%以上,以白杨林占比最高,达到了84.1%,3种人工林的根面积密度均呈现出随径级的增加而减少的趋势(图5)。在0~100 cm土层中细根根面积密度表现为白杨林>油松林>山杏林,且在20~100 cm土层中差异显著(P<0.05);而中根及粗根的根面积密度在多数土层中以油松林为最高,但在各个土层中未体现出显著性差异(P>0.05)。

2.4 3种人工林根生物量密度的分布特征

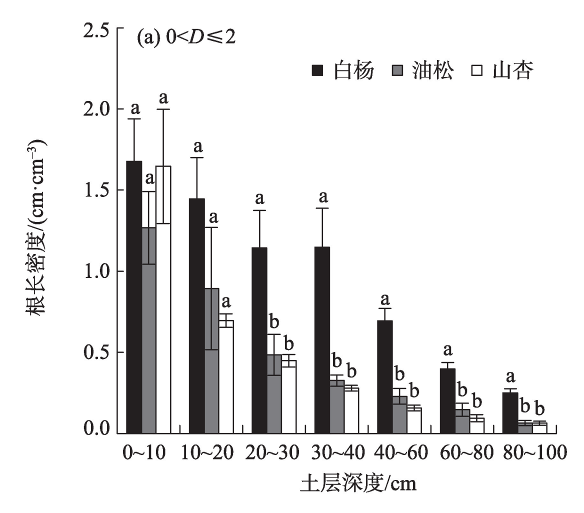
如图6所示,3种人工林的总根生物量密度在0~30 cm、40~60 cm和80~100 cm土层中均表现为油松林最高,在30~40 cm、60~80 cm土层中则以山杏林最高,但3种人工林的总根生物量密度在各个土层中均无显著性差异。如图7所示,3种人工林的细根根生物量密度除30~40 cm土层外均表现为油松林>白杨林>山杏林,且80~100 cm土层油松林显著高于山杏林(P<0.05)。垂直土壤剖面上,3种人工林细根生物量密度整体上均随着土层深度的增加而减少。

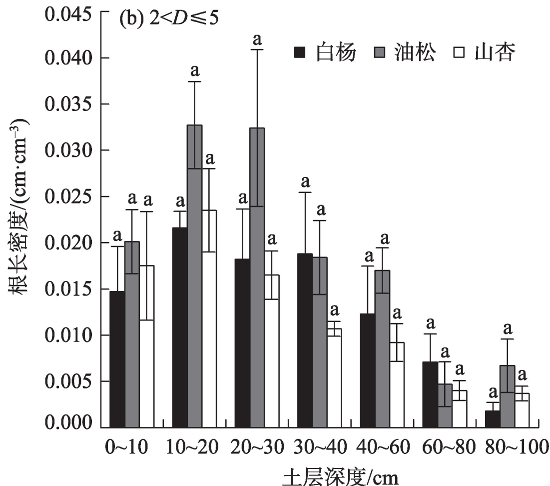
2.5　不同根系指标与土壤理化性质的相关性分析

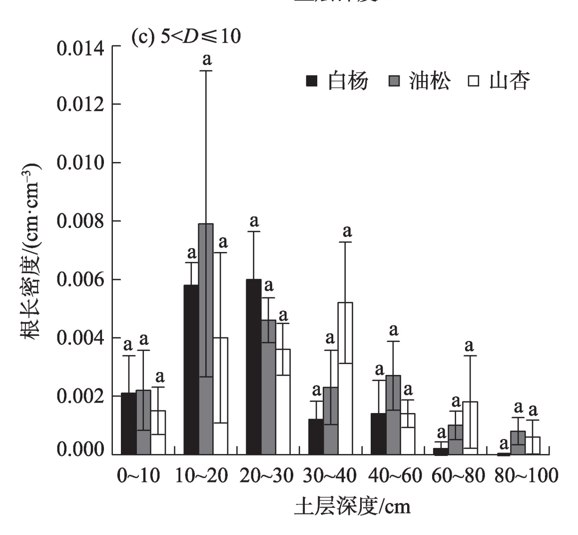
通过相关性分析发现,细根的根长密度、根面积密度及根生物量密度与土壤全氮、土壤全碳、土壤有机碳及土壤含水量之间呈极显著正相关关系(P<0.01)(表3)。中根的根长密度和根面积密度与土壤全氮、土壤全碳、土壤有机碳之间呈极显著正相关关系(P<0.01),与土壤全磷呈显著相关关系(P<0.05)。粗根的根长密度与全碳和有机碳、根面积密度与全碳呈显著正相关关系(P<0.05)。总根长密度及总根面积密度与土壤全氮、土壤全碳、土壤有机碳及土壤含水量之间呈极显著正相关关系(P<0.01),总根生物量密度与土壤全氮、土壤全碳、土壤有机碳之间呈极显著正相关关系(P<0.01)。

3　讨 论

根系的生物量密度是植物地下部分碳汇集能力的重要体现,根长密度及根面积密度可以反映植物根系对水分及养分吸收的能力[23]。林木可以根据不同的环境调整生长策略,养分不足,水分亏缺以及较差的气候条件等都会影响林木将更多的生







注：*D*为根系直径，下同。

图3　3种人工林不同径级不同土层根长密度分布

Fig. 3　Different diameter classes root length density distribution of three artificial forests in different soil layers

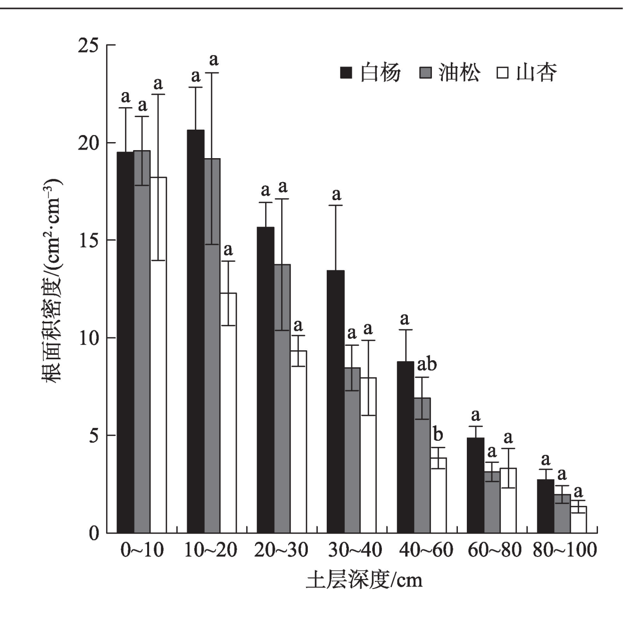
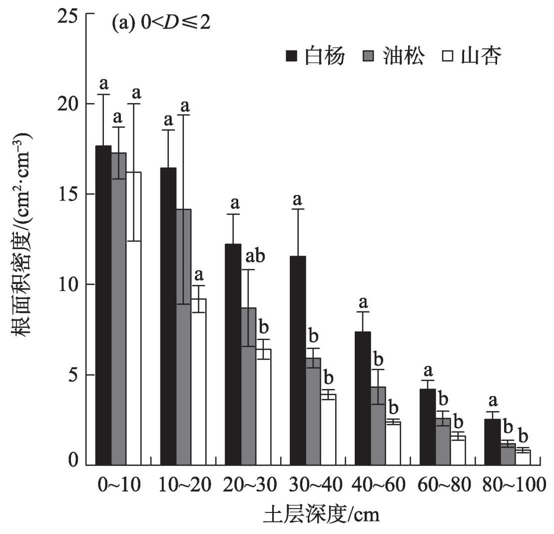


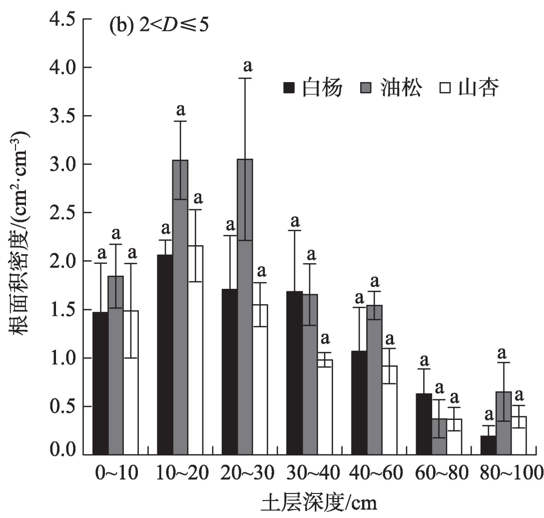
图4　不同土层深度下3种人工林的总根面积密度分布

Fig. 4　Total root area density distribution of three artificial forests in different soil depths

物量分配到根系，研究区位于黄土高原，生长环境相对恶劣，尤其是水分的匮乏，限制了植物的生长发育。白杨、油松及山杏均属于速生树种，具有较强的耗水性，其良好的生长发育依赖于其根系的强大吸水能力。3种人工林中白杨林总的根长密度和根面积密度高于油松林和山杏林，而油松的总根系生物量高于其他两种人工林，在该区域根系生物量的多寡一定程度上可能是其对于黄土高原恶劣环境的适宜程度的体现，本研究所选取的3种人工林中，拥有更高根系生物量的油松林，其长势在流域中要优于其他两种人工林。

植物根系通过吸收土壤中的养分及水分来供应地上植被的生长[24]。不同径级的根系具有不同的功能，径级较大的根系主要功能是运输、贮藏，对养分及水分的运输效率较高，极大的避免了恶劣生态环境的伤害和病原菌的侵染。而径级较小的根系尤其是细根（直径≤2 mm）具有更强的吸收功能，一些研究认为根系的动态主要以细根最为活跃，保持细根吸收能力是维持根系生理生态功能的关键。根系直径越小，比根长和比根面积越大，与土壤微生物接触机会就更多，被微生物分解利用的可能就更大，研究表明细根分解速度明显高于粗根，并且细根养分与水分的吸收效率相对较高[25-26]。本研究中，白杨林地细根的根长密度及根面积密度均高于其他两种人工林，油松林细根的根生物量密度，中根及粗根的根长及根面积密度要高于白杨林及山杏林。从不同径级的根系分析来看，白杨林根系吸收养分及水分的能力要强于油松林及山杏林，





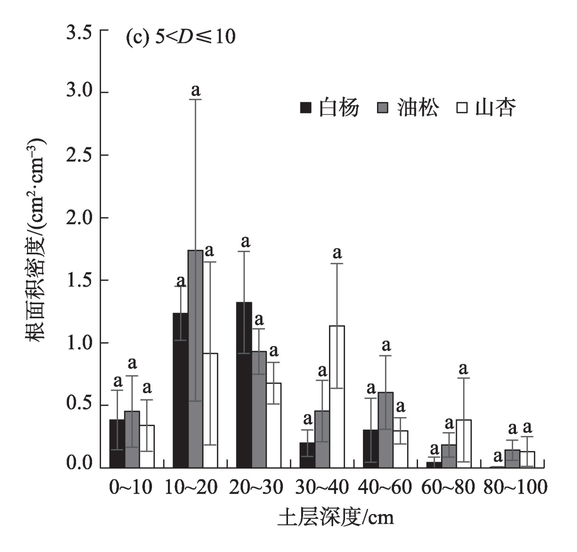


图5　3种人工林不同径级不同土层根面积密度分布

Fig. 5　Different diameter classes root area density distribution of three artificial forests in deterrent soil layers

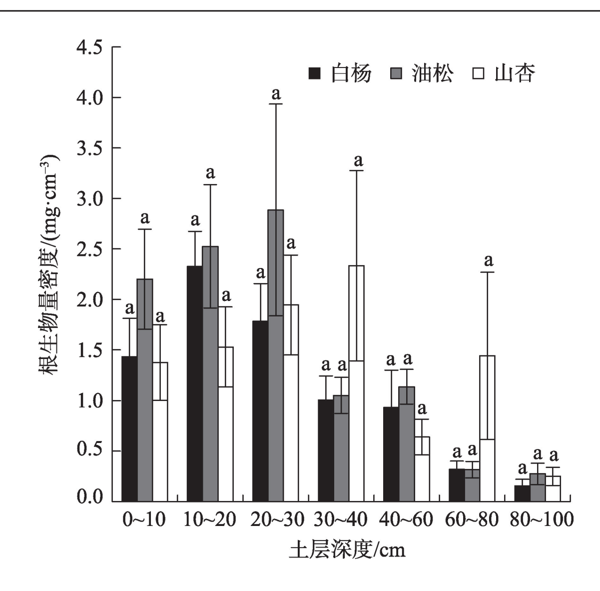


图6　不同土层深度下3种人工林的总根生物量密度分布

Fig. 6　Total root biomass density distribution of three artificial forests in different soil depths

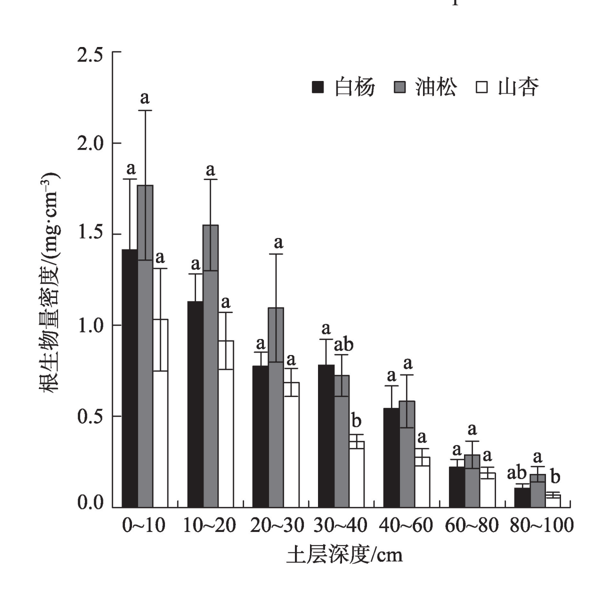


图7　不同土层深度下3种人工林的细根根生物量密度分布

Fig. 7　Fine root biomass density distribution of three artificial forests in different soil depths

而油松林拥有对养分及水分较高的运输效率。

在垂直方向上，Gale等[27]通过分析上百份树木根系的分布情况，得出树木根系主要分布在土壤上层。与该研究的结果相似，本研究所选的3种人工林的细根和总根的根长密度、根面积密度及根生物量密度均随着土层深度的增加而减少，呈现出表聚现象。在森林系统中，林木主要通过根系从土壤中吸收水分和养分，土壤水分和养分的分布状况影响根系活力与根系的分布情况[28]。本研究中随土层深度的变化土壤水分和养分与植物根系分布的变化趋势相一致，与以往的研究相似，且垂直方向上土壤水分对根系生长的影响主要体现在细根上。

表3 林木根系与土壤性质相关性分析

Tab. 3 Correlation analysis of forest root system and soil characteristics

根系指标	全氮	全碳	有机碳	含水量	全磷
细根根长密度	0.567**	0.475**	0.674**	0.624**	-0.163
中根根长密度	0.559**	0.667**	0.538**	0.227	-0.341**
粗根根长密度	0.214	0.265*	0.254*	0.127	0.083
总根长密度	0.573**	0.484**	0.679**	0.624**	-0.220
细根根面积密度	0.640**	0.596**	0.733**	0.555**	0.147
中根根面积密度	0.534**	0.643**	0.524**	0.224	-0.321*
粗根根面积密度	0.215	0.261*	0.243	0.120	0.101
总根面积密度	0.650**	0.641**	0.737**	0.533**	-0.209
细根根生物量密度	0.671**	0.670**	0.715**	0.406**	-0.238
总根生物量密度	0.380**	0.447**	0.431**	0.246	-0.036

注:*表示在0.05水平上显著;**表示在0.01水平上显著。

3种人工林细根和总根的根长密度、根面积密度与土壤全碳、全氮、有机碳及含水量之间,细根与总根的根生物量密度与土壤全碳、全氮、有机碳之间表现出极显著的正相关关系,这与以往在宁夏针对油松人工林根系研究中根系与土壤碳氮的关系相一致[29]。Pregitzer等[30]的研究结果也表明较高的土壤含水率和氮含量会显著促进根系的生长并延长根系的寿命。土壤中较高的碳氮含量可以给根系的生长提供更好的营养环境,有利于树木根系的生长发育,较高的土壤碳氮含量可能是促进油松林具有较高根系生物量的重要原因。同时,不同人工林根系周转速率存在一定差异,油松林具有更多根系生物量,其新生根也相对较多,而新生根会产生更多根系分泌物与较强的激发效应[31],造成土壤的理化性质发生改变,进而影响林木个体的生长发育。但也有研究表明,人工林土壤中碳氮含量较低,根系的生物量反而较高[32]。研究结果的不同可能与立地条件的差异、采样的方法、时间、深度以及根系的划分标准等的不同有关[33]。

4 结 论

本文通过对白杨林、油松林和山杏林不同径级不同土层根系分布规律的研究发现,3种人工林中,白杨的总根长密度和总根面积密度最高,油松的总根生物量密度最高;3种人工林不同径级根系中均以细根为主,其中白杨的细根根长密度和根面积密度高于其他两种人工林,油松林细根的根生物量密度,中根及粗根的根长及根面积密度高于其他两种人工林。土壤碳、氮和水分等土壤理化性质与根系生长之间息息相关,能够直接影响根系在土层中的分布。从总根系及不同径级根系的整体分布情况看,3种典型人工林中白杨和油松的生长适宜性优于山杏。

参考文献(References):

[1] Wang C, Ma Y, Troqisch S, et al. Soil respiration is driven by fine root biomass along a forest chronosequence in subtropical China[J]. Journal of Plant Ecology, 2017, 10(1): 36–46.

[2] Fitter A H, Sticklt R, Harvey M L, et al. Architectural analysis of plant root systems 1: Architectural correlates of exploitation efficiency[J]. New Phytologist, 1991, 118: 375–382.

[3] 张晓, 黄晓强, 信忠保, 等. 北京山区不同林分林下植被根系分布特征及其影响因素[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(4): 51–57. [Zhang Xiao, Huang Xiaoqiang, Xin Zhongbao, et al. Distribution characteristics and its influencing factors of understory vegetation roots under the typical plantations in mountainous area of Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(4): 51–57.]

[4] 张立恒, 王学全, 贾志清, 等. 高寒沙地不同林龄中间锦鸡儿人工林根系分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(11): 163–168. [Zhang Liheng, Wang Xuequan, Jia Zhiqing, et al. Root distribution characteristics of *Caragana intermedia* plantations at different ages in alpine sandy land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(11): 163–168.]

[5] 张小全. 环境因子对树木细根生物量、生产与周转的影响[J].林业科学研究, 2001, 14(5): 566–573. [Zhang Xiaoquan. Fine-root biomass, production and turnover of trees in relations to environmental conditions[J]. Forest Research, 2001, 14(5): 566–573.]

[6] 李佳梅, 朱启良, 马璟, 等. 华北石质山地麻栎和刺槐混交林浅层细根特征[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(1): 31–42. [Li Jia-

mei, Zhu Qiliang, Ma Jing, et al. Comparison on fine root traits of *Quercus accutissima* and *Robinia pseudoacacia* in lower soil layer in rocky mountainous area of northern China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(1): 31−42.]

[7] Fort F, Cruz P, Catrice O, et al. Root functional trait syndromes and plasticity drive the ability of grassland Fabaceae to tolerate water and phosphorus shortage[J]. Environmental and Experimental Botany, 2015, 110: 62−72.

[8] Mueller K E, Blumenthal D M, Pendall E, et al. Impacts of warming and elevated CO_2 on a semi-arid grassland are non-additive, shift with precipitation, and reverse over time[J]. Ecology Letters, 2016, 19(8): 956−966.

[9] Zhou M, Wang J, Bai W, et al. The response of root traits to precipitation change of herbaceous species in temperate steppes[J]. Functional Ecology, 2019, 33(10): 2030−2041.

[10] 姜琦, 陈光水, 郭润泉, 等. 增温与氮添加对杉木幼苗细根化学计量学的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(3): 723−732. [Jiang Qi, Chen Guangshui, Guo Runquan, et al. Effects of warming and nitrogen addition on fine root stoichiometry of Chinese fir seedlings [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(3): 723−732.]

[11] 刘瑞强. 亚热带常绿阔叶林演替过程中植物根系对土壤碳累积的影响及机制[D]. 上海: 华东师范大学, 2019. [Liu Ruiqiang. Effects of Plant Roots on Soil Carbon Accumulation Along Subtropical Ever-Green Forest Successions[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.]

[12] 张立恒, 李清雪, 王学全, 等. 高寒沙区中间锦鸡儿人工林细根动态及其周转[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 215−222. [Zhang Liheng, Li Qingxue, Wang Xuequan, et al. Biomass dynamics and turnover of fine roots of *Caragana intermedia* plantations in alpine sandy land[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 215−222.]

[13] Williamson M H, Fitter A. The characters of successful invaders [J]. Biological Conservation, 1996, 78(1−2): 163−170.

[14] Pregitzer K S, Laskowski M J, Burton A J, et al. Variation in sugar maple root respiration with root diameter and soil depth[J]. Tree Physiology, 1998, 18(10): 665−670.

[15] 满洲, 胡婵娟, 冯德显, 等. 黄土丘陵区白杨纯林群落结构调整对土壤碳的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(12): 37−44. [Man Zhou, Hu Chanjuan, Feng Dexian, et al. Effect of community structure adjustment of pure *Populus tomentosa* planataion on soil carbon in the semi-arid loess plateau of China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(12): 37−44.]

[16] 韩新生, 许浩, 蔡进军, 等. 宁南黄土丘陵区3种典型林分的结构与水文影响比较[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 194−201. [Han Xinsheng, Xu Hao, Cai Jinjun, et al. Comparison of structure and hydrological influence of three typical stands in Loess Hilly regions of southern Ningxia[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(6): 194−201.]

[17] 冯棋, 杨磊, 王晶, 等. 黄土丘陵区植被恢复的土壤碳水效应研究[J]. 生态学报, 2019, 39(18): 6598−6609. [Feng Qi, Yang Lei, Wang Jing, et al. Response of soil moisture and soil organic carbon to vegetation restoration in deep soil profiles in Loess Hilly Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): 6598−6609.]

[18] 戴银月, 孙平生, 康迪, 等. 黄土丘陵区人工林细根生物量及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2018, 37(8): 4−11. [Dai Yinyue, Sun Pingsheng, Kang Di, et al. Fine root biomass of artificial forests in loess hilly region and its influencing factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(8): 4−11.]

[19] 张咪, 刘永峰, 贾艳梅, 等. 黄土高原刺槐细根形态特征和生物量研究[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(2): 28−33. [Zhang Mi, Liu Yongfeng, Jia Yanmei, et al. Fine root morphology and biomass of *Robinia pseudoacacia* in the loess plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(2): 28−33.]

[20] 瞿欢欢, 邓洪平, 梁盛, 等. 毛竹扩张对濒危植物桫椤根系形态可塑性的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1219−1227. [Qu Huanhuan, Deng Hongping, Liang Sheng, et al. Effects of *Phyllostachys heterocycla* expansion on morphological plasticity of endangered plant Alsophila spinulosa root system[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1219−1227.]

[21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. [Bao Shidan. Soil Analysis in Agricultural Chemistry[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.]

[22] 侯海潮, 丁丽, 许中旗, 等. 燕山北部山地典型造林树种幼树根系分布特征[J]. 林业资源管理, 2018, 68(4): 10−16. [Hou Haichao, Ding Li, Xu Zhongqi, et al. Root distribution of young trees of typical species in the northern region of Yanshan mountains[J]. Forest Resources Management, 2018, 68(4): 10−16.]

[23] 罗达, 史彦江, 宋锋惠, 等. 平欧杂种榛细根空间分布特征[J]. 林业科学研究, 2019, 32(1): 81−89. [Luo Da, Shi Yanjiang, Song Fenghui, et al. Spatial distribution characteristics of fine roots in monoculture system of *Corylus heterophylla*×*Corylus avellana*[J]. Forest Research, 2019, 32(1): 81−89.]

[24] 陈柳娟, 钟全林, 李宝银, 等. 翅荚木人工林不同径阶间细根主要功能性状与根际土壤养分的关系[J]. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3627−3634. [Chen Liujuan, Zhong Quanlin, Li Baoyin, et al. Relationship between the main functional traits of fine root and the rhizosphere soil nutrients of different diameter classes in *Zenia insignis* plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(11): 3627−3634.]

[25] Zhuang L Y, Yang W Q, Wu F Z, et al. Diameter-related variations in root decomposition of three common subalpine tree species in southwestern China[J]. Geoderma, 2019, 311 (1): 1−8.

[26] Pregitzer K S, Deforest J D, Burton A J, et al. Fine root architecture of nine North American trees[J]. Ecological Monographs, 2002, 72: 293−309.

[27] Gale M R, Grigal D E. Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1987, 17(8): 829−834.

[28] Benot C, Nicolas B, Courchesne F, et al. A cyclical but asynchro-

nous pattern of fine root and woody biomass production in a hardwood forest of southern Quebec and its relationships with annual variation of temperature and nutrient availability[J]. Plant and Soil, 2003, 250(1): 49−57.

[29] 苏纪帅, 金晶炜, 白于, 等. 宁夏油松林细根生物量和土壤特性研究[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(4) : 1−7. [Su Jishuai, Jin Jingwei, Bai Yu, et al. Studies on fine root biomass and soil properties of *Pinus tabulaeformis* forests in Ningxia[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29 (4): 1−7.]

[30] Pregitzer K S, Hendrick R L, Fogel R. The demography of fine roots in response to patches of water and nitrogen [J]. New Phytologist, 1993, 125(3): 575−580.

[31] 孙悦, 徐兴良, Yakov K K. 根际激发效应的发生机制及其生态重要性[J]. 植物生态学报, 2014, 38(1):62−75. [Sun Yue, Xu Xingliang, Yakov K K. Mechanisms of rhizosphere priming effects and their ecological significance[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(1): 62−75.]

[32] Kochsiek A, Tan S, Russo S E. Fine root dynamics in relation to nutrients in oligotrophic Bornean rain forest soils[J]. Plant Ecology, 2013, 214(6): 869−882.

[33] 钱文丽, 卢元, 王韶仲, 等. 混交对红松人工林细根生物量和空间分布的影响[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(2): 1−5. [Qian Wenli, Lu Yuan, Wang Shaozhong, et al. Influence of species mixing on fine root biomass and spatial distribution in *Pinus koraiensis* plantation[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44 (2): 1−5.]

Root distribution characteristics of three typical plantations in a Loess Hills region

LI Hao[1,2], HU Chanjuan[1], ZHAO Rongqin[2], GUO Lei[1], MAN Zhou[3]

(1. Institute of Geographical Science, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450052, Henan, China; 2. College of Surveying and Geo-Informatics, North China University of Water Resource and Electric Power, Zhengzhou 450045, Henan, China; 3. Zhengzhou Branch, Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: The root is the main organ through which plants absorb water and nutrients. The development and distribution of roots have an extremely important impact on plant growth. In order to understand the root distribution characteristics of typical artificial forests in Loess Hills areas and provide a scientific basis for vegetation restoration in the future, a case study was carried out on three artificial forests (*Populus tomentosa*, *Pinus tabuliformis* and *Armeniaca sibirica*), located in Longtan watershed, Anding District, Dingxi City, Gansu Province. The study analyzed root length density, root area density and root biomass density in different soil depths and diameter degrees, and the results showed that: (1) Fine roots of different diameter classes were dominant in all three artificial forests. The root length and root area densities of fine roots and total roots were the following: *Populus tomentosa*>*Pinus tabulaeformis*>*Armeniaca sibirica*, while the root biomass density was the following: *Pinus tabulaeformis*>*Populus tomentosa*>*Armeniaca sibirica*. The Pinus tabulaeformis forest had the highest root length and root area densities of middle roots and coarse roots. (2) In the vertical soil profile, the root length, root area, and root biomass densities of total and fine roots decreased with increasing soil depth. However, the vertical distribution feature of middle and coarse roots was not clear. (3) The root length density, root area density and root biomass density of fine and total roots were significantly and positively correlated with soil total carbon, total nitrogen, organic carbon, and water content. The root length and root area densities of middle roots were significantly correlated with soil total carbon, total nitrogen, total phosphorus, and organic carbon. The root length and root area densities of coarse roots were significantly correlated with soil total carbon. The increase in soil carbon, nitrogen and water contents had a synergistic effect on the growth of the root system to a certain extent.

Keywords: Loess Hills region; plantation; root; diameter class